Aus dem Physiologischen Institut der Universität Basel
Direktor: Prof. Dr. F. Verzár

Untersuchungen über das Lungenvolumen bei Sauerstoffmangel und bei Kohlensäureanreicherung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der medizinischen Fakultät der Universität Basel

vorgelegt von

WALTER SCHWEIZER
von Schweizersholz

BASEL
Buchdruckerei E. Birkhäuser & Cie., A.G.
1944

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546713_0062

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Basel
Direktor: Prof. Dr. F. Verzár

Untersuchungen über das Lungenvolumen bei Sauerstoffmangel und bei Kohlensäureanreicherung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der medizinischen Fakultät der Universität Basel

vorgelegt von

WALTER SCHWEIZER
von Schweizersholz

BASEL
Buchdruckerei E. Birkhäuser & Cie., A.G.
1944

Von der medizinischen Fakultät Basel genehmigt auf Antrag von Herrn Professor Dr. F. Verzár.

Promotion am 22. Dezember 1943.

I. Einleitung.

Bohr[1]) hat 1907 erstmals die Veränderungen des Lungenvolumens unter verschiedenen Bedingungen (Änderung der Körperstellung, Muskelarbeit, Veränderung des Gehaltes der Einatmungsluft an O_2 und CO_2, willkürliche Dyspnoe und Apnoe) untersucht und fand, dass „jeder Faktor, der die an die respiratorischen Funktionen der Lunge gestellten Forderungen in hinlänglichem Masse vergrössert auch die „Mittelkapazität" vermehrt, so dass die Atmung mit mehr gefüllten Lungen stattfindet; umgekehrt wird die Mittelkapazität der Lunge geringer, wenn die respiratorische Arbeit abnimmt". Die Bedeutung dieses Vorganges sah *Bohr* erstens in der Vergrösserung der respiratorischen Oberfläche und zweitens in der Erleichterung der Zirkulation des Blutes in der Lunge durch Erweiterung der Kapillargefässe.

Hasselbalch[2])[3]) wie auch *Krogh* und *Lindhard*[4]) beobachteten ebenfalls Lungenvolumänderungen unter verschiedenen Bedingungen, jedoch nur bei einem kleinen Teil der von ihnen untersuchten Personen und auch bei diesen in stark unterschiedlichen Grössen, so dass sie deshalb diesen Volumänderungen eine regulatorische Funktion absprachen.

Hasselbalch untersuchte die Abhängigkeit des Lungenvolumens von den Schwankungen der Aussentemperatur und fand, dass bei nicht abgehärteten Versuchspersonen niedere äussere Temperaturen eine hohe „Mittellage" bewirken und umgekehrt. *Forschbach* und *Bittdorf*[5]) wiesen bei Schmerzempfindungen an der Peripherie (faradische Reizung) eine Erhöhung der Mittellage nach. Ferner fanden sie eine starke Beeinflussbarkeit des Lungenvolumens durch psychische Reize. *Siebeck*[6]) beobachtete bei Stenoseatmung eine Vergrösserung des Lungenvolumens.

Temperatur- und Schmerzreize, psychische Einflüsse sowie Ein- oder Ausatmungsstenosen beeinflussen jedoch bekanntlich auch die Atemfrequenz und Atemtiefe. Ferner ist ja bekannt, wie verschieden individuell die Atemreaktionen sind. Es geht deshalb nicht an, gerade wegen der grossen wechselnden Beeinflussbarkeit des Lungenvolumens durch verschiedene Faktoren diesem eine regulatorische Bedeutung abzusprechen.

Neu aufgenommen wurde dieser ganze Fragenkomplex durch *Verzár*[7]), der 1933 die Frage mittels Körperplethysmographie untersuchte. Sowohl beim Mensch wie beim Tier fand er, dass vermehrter Sauerstoffbedarf das Lungenvolumen erhöht. Beim Menschen konnten damals nur Arbeitsversuche gemacht werden. Beim Tier wurde die

Wirkung auch für Sauerstoffmangel und Kohlensäureanreicherung bewiesen. Er nannte diese Lungenerweiterungsreaktion die „dritte Form der Atmungsregulation", die neben der Variation von Atemfrequenz und Atemtiefe durch Vergrösserung der respiratorischen Oberfläche der Lunge eine vermehrte Atmungsleistung ermöglicht. Er stellte sich also in der Deutung seiner Versuchsergebnisse auf die Basis der Auffassung von *Bohr*.

In der nächsten Zeit haben sich dann aber *Asmussen* und *Christensen*[8]) — ebenso wie sich ihre Vorgänger *Hasselbalch*, *Krogh* und *Lindhard* gegen *Bohr* gewandt hatten — nun gegen *Verzárs* Deutung gewendet und der Lungenvolumänderung jegliche regulatorische Bedeutung abgesprochen. Sie führten die bei der Muskelarbeit im Körperplethysmographen beobachteten Volumänderungen auf Haltungswechsel der Versuchspersonen, sowie auf Temperaturerhöhung im Plethysmographen zurück. Sie vergassen jedoch, auf die Sauerstoffmangelversuche *Verzárs* an Tieren einzutreten, bei welchen gerade alle Haltungsänderungen und Temperaturwirkungen sicher ausgeschlossen waren, weil sie an narkotisierten Tieren im Thermostaten gemacht wurden. Diese Versuche hätten die Autoren keinesfalls übersehen dürfen, wenn sie die Existenz einer solchen Volumzunahme bezweifeln. Ferner ist zu bemerken, dass eine Lungenvolumzunahme bei Muskelarbeit im Körperplethysmographen durch eine plötzliche Temperatursteigerung zwar vorgetäuscht werden könnte; der allmähliche Rückgang dieser Volumsteigerung, der in den plethysmographischen Arbeitskurven nach Aufhören der Arbeit besonders deutlich ist, lässt sich jedoch keinesfalls durch eine entsprechende Abkühlung erklären und noch viel weniger durch eine Haltungsänderung.

Dagegen sind die eigenen Versuche von *Asmussen* und *Christensen*[8]), welche unter Benützung einer Mischmethode zur Bestimmung des Lungenvolumens an vier Versuchspersonen bei, wie sie sagen, „stationärer Körperhaltung" am *Krogh*'schen Fahrradergometer, sowie in der Unterdruckkammer bei einer Druckverminderung auf 495 mm Hg gemacht wurden, unbeweisend. Sie beobachteten „weder bei Arbeit, bei unveränderter Körperhaltung, noch bei erniedrigtem O_2-Druck während Ruhe oder bei Arbeit eine sichere Vergrösserung der Mittelkapazität, jedenfalls nicht von der Grössenordnung, die *Verzár* findet". Um mit der Mischmethode mit Einatmen eines Fremdgases arbeiten zu können, müssen sie Ventile benützen. Dabei wird aber bereits das Lungenvolumen beeinflusst, wie überhaupt jede Änderung des Atemmechanismus auf alle drei Formen der Atmungsregulation einwirken kann. Es ist deshalb schwer zu überblicken, wie dieser Faktor ihre Ergebnisse beeinflusst. Jedenfalls muss man sagen, dass die Körperplethysmographie eine direkte Methode der Lungen-

volummessung ist, und wenn ihre Resultate mit denen der Mischmethode nicht übereinstimmen, so ist eher an dem Wert der letzteren für die Lösung dieses Problemes zu zweifeln.

Nach *Verzár* besteht der periphere Mechanismus der Lungenerweiterung darin, dass der Tonus der glatten Lungenmuskulatur abnimmt. Diese wurde ausführlich von *Baltisberger*[9]) beschrieben und auch von *Aschoff* bestätigt. Sie liegt nicht nur circulär um die Bronchen und Bronchiolen, sondern auch in der Wand der Alveolarsäcke. *Verzár* nahm an, dass in der ruhig atmenden Lunge physiologisch atelectatische Bezirke vorhanden sind, die im Augenblick erhöhter Atmungsleistung durch Nachlassen des Tonus der glatten Muskulatur eröffnet und in die Durchlüftung einbezogen werden. In der ruhig atmenden Lunge wären also offene und geschlossene Bezirke nebeneinander vorhanden. Den histologischen Beweis solcher physiologischer Atelectasen erbrachten *Verzár* und *Jecker*[10]) durch Untersuchung der Lungen von Meerschweinchen, die durch ein besonderes Verfahren momentan getötet wurden, um agonale Veränderungen auszuschliessen.

Seit diesen letzten Untersuchungen hat *von Gehlen*[11]) die Existenz dieser glatten Lungenmuskulatur wieder bestätigt. Trotzdem hält *von Möllendorf*[12]) ihre Existenz noch für unbewiesen, ebenso wie auch die von dem Histologen *Jecker*[10]) abgebildeten Atelectasen. Eine Aufklärung, wie mit dieser Ansicht die überzeugenden Bilder von *Heidenhain* und *Baltisberger*[9]) zu erklären wären, hat uns aber *von Möllendorf* nicht gegeben. Die Unsicherheit, die durch diese Stellungnahme für den Physiologen erwächst, kann nur durch weitere histologische Arbeiten geklärt werden.

Von physiologischer Seite hat *Huizinga*[13]) sich skeptisch über die Möglichkeit der Existenz von Atelectasen in der Lunge ausgesprochen. Dagegen hat *Engelhardt*[14])[15]) den von *Verzár* ausgesprochenen Gedanken, dass bei der Atmung nicht alle Lungenabschnitte gleichmässig und gleichzeitig durchlüftet werden, aufgenommen. Seine neueste Arbeit[15]) über die Verschiedenheiten des Kohlensäuregehaltes in verschiedenen Lungenabschnitten zur selben Zeit scheint diese Annahme auch gasanalytisch zu bestätigen. In seiner Arbeit „Die lokale bronchomotorische Reaktion" nimmt er an, dass ein Atemzug nur einen Teil der gesamten Lungenläppchen durchlüftet. Diejenigen, welche an der Durchlüftung nicht teilnehmen, seien jedoch nicht atelectatisch — und darin liegt der Gegensatz zur Anschauung *Verzárs* —, sondern gleichfalls luftgefüllt, jedoch gegen die Bronchen abgeschlossen. Der Abschluss dieser Lungenteile geschieht auch nach seiner Ansicht durch das Zusammenwirken der Gesamtheit der in der Lunge befindlichen glatten Muskulatur, deren Tonus sich ändert. Die Ursache für Tonus-

änderungen liege in der Verschiedenheit des Kohlensäuregehaltes der Lungenläppchen, der in den durchlüfteten niedrig sei, während er in den abgeschlossenen langsam ansteigt. Hat er eine gewisse Höhe erreicht, so führt er zu einer Erschlaffung der glatten Muskulatur und zur Eröffnung des Läppchens („lokale bronchomotorische Reaktion"). Es arbeitet also die Lunge in einer Art von Schichtwechsel, der durch eine periphere Wirkung der Kohlensäure auf die glatte Muskulatur der Lunge zustande kommt.

Wir können diese Hypothese von *Engelhardt*, dass Kohlensäureanhäufung eine Erschlaffungswirkung auf die glatte Muskulatur hat, nach einer persönlichen Mitteilung von Professor *Verzár*, weitgehend stützen. *Verzár*[16]) hat beschrieben, dass die glatte Muskulatur der Froschlunge durch Kohlensäure stark gehemmt wird. Die *Engelhardt*'sche Auffassung über den Mechanismus scheint also sehr gut experimentell gestützt und steht durchaus nicht in einem Gegensatz zu der Annahme von Atelectasen, denn wesentlich ist nicht, ob gewisse Teile der Lunge vollständig luftleer oder ob sie nur abgeschlossen sind. Wesentlich ist, dass sie funktionell ausgeschaltet sind.

Die Lungenvolumzunahme bei Körperarbeit, die *Verzár* beschrieben hat, sah *Engelhardt* auch. Er glaubt aber, dass diese nichts mit der Tätigkeit der glatten Muskulatur der Lunge zu tun habe. Sie gehe vielmehr nur mit einer Vorwölbung der Bauchdecke einher, die auf eine Erhöhung des Zwerchfelltonus zurückzuführen sei. Die Änderung des Füllungszustandes der Lunge, die durch eine Tonusänderung des Zwerchfelles hervorgerufen wird, sieht er als rein passiven Vorgang an und schreibt ihr keine regulatorische Bedeutung zu.

Dazu ist aber zu bemerken, dass der Tonus des Zwerchfells (und der übrigen Atmungsmuskulatur) und derjenige der glatten Lungenmuskulatur wahrscheinlich eng gekoppelt sind, wie *Verzár*, *Haffter*, *Széchényi-Nagy* und *Wirz*[17]) gezeigt haben. *Engelhardt* scheinen ausserdem die Untersuchungen von *Vischer*[18]) mit dem Thorakographen, der die Volumvergrösserung bei Arbeit auch in einer Thoraxerweiterung fand, nicht bekannt zu sein. Wir bewerten also diese *Engelhardt*'schen Untersuchungen im Wesentlichen als eine Bestätigung der Befunde über die Volumzunahme der Lunge bei Muskelarbeit.

Überblickt man die neueren Arbeiten über die Veränderungen des Lungenvolumens, so ergibt sich, dass seine Existenz von *Asmussen* und *Christensen* zwar bestritten, aber durchaus nicht widerlegt und von *Engelhardt* umgekehrt bestätigt wird. Die Frage nach der Ursache, nach den peripheren Mechanismen, speziell der Rolle der glatten Muskulatur, ist histologisch, — wie es scheint —, noch nicht genügend geklärt. Die Deutung dieser Volumveränderungen als regula-

torische Funktion ist noch diskutierbar, obwohl gerade die Arbeiten von *Engelhardt* eine Bestätigung der Auffassung über die Zweckmässigkeit dieser Reaktion zu bringen scheinen.

Auf Anregung von Professor *Verzár* habe ich deshalb die Frage untersucht, ob beim Menschen bei Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der Einatmungsluft, sowie bei Anhäufung von Kohlensäure die Lungenvolumvergrösserung sich nachweisen lässt. Die körperplethysmographische Methode scheint mir gegenüber den Mischmethoden eine überzeugendere und klarere Sprache zu sprechen. Im Gegensatz zu Arbeitsversuchen werden bei Einatmungsversuchen bei vollständiger Körperruhe alle Störungen durch Veränderungen der Körperstellung oder der Wärmeproduktion innerhalb des Kessels umgangen. Wenn für Körperarbeitsversuche solche Möglichkeiten diskutiert werden konnten, so kann das keinesfalls für Ruheversuche mit Einatmung von Gasen der Fall sein[29]).

Bei Anwendung der Körperplethysmographie als Untersuchungsmethode wird es notwendig, die Einatmungsgasgemische durch eine Gasmaske zuzuführen. Es mussten deshalb auch Kontrollversuche über die Wirkung der Gasmaske auf das Lungenvolumen gemacht werden.

Schon früher sind die Lungenvolumänderungen bei Arbeit auch durch die Thorakographie kontrolliert worden, und dasselbe ist auch hier in einigen Versuchen bei Atmung von Gasgemischen durchgeführt worden. Auf diese Weise soll untersucht werden, ob auch beim Menschen so wie beim Tier eine regulatorische Veränderung des Lungenvolumens unter bestimmten Umständen eintritt.

II. Zum Begriff der Mittellage und des Lungenvolumens.

In der Literatur über Atembewegungen findet man immer wieder den Begriff der „Mittellage". Er wird zum Begriff des Lungenvolumens in Beziehung gesetzt, ist jedoch nicht klar und eindeutig definiert.

Bohr benützt in der erwähnten grundlegenden Arbeit[1]) die Bezeichnungen „Mittellage" und „Mittelkapazität" in der folgenden Weise: „Während diese 500 cm^3 (Respirationsluft) bei der gewöhnlichen ruhigen Atmung ein- und ausgeatmet werden, haben die Lungen weder ihre am meisten gefüllte, noch ihre am meisten zusammengefallene Lage, sondern eine Lage, die etwa das Mittel derselben bildet, die vitale Mittellage. Das Volumen der in der Mittellage befindlichen Lunge heisst die Mittelkapazität; diese ist die Summe der Residual- und der Reserveluft".

Die Gesamtkapazität der Lunge setzt sich zusammen aus der Residualluft, der Reserveluft, der Respirationsluft und der Komplementärluft.

Übertragen wir diese Definition der Mittelkapazität auf die Körperplethysmographie, so wird sie in den so geschriebenen Atmungskurven durch den Verlauf einer Linie dargestellt, welche die Endpunkte aller Atemzüge bei Exspiration verbindet. Diese Linie zeigt dann direkt die Änderungen der Mittelkapazität an (Abb. 1, I).

Man könnte jedoch, wie das *Bass*[19]) tut, als „Mittellage" die Verbindungslinie der Mittelpunkte aller Atemzüge in der Mitte zwischen der Lage bei Exspiration und Inspiration bezeichnen. Eine Verschiebung der so definierten Mittellage sagt jedoch über eine Veränderung der Mittelkapazität nicht unbedingt etwas aus, wie das aus den nachfolgenden schematischen Zeichnungen hervorgeht. Sie könnte eintreten, ohne dass sich die Mittelkapazität ändert, aber sie kann auch eine Änderung derselben begleiten. Der Wert, um den sie sich in einem solchen Fall verschiebt, ist dabei nicht notwendigerweise identisch mit der Grösse der Mittelkapazitätsänderung. Im Plethysmogramm würden die in Abbildung 1, II—VI, dargestellten Fälle möglich sein.

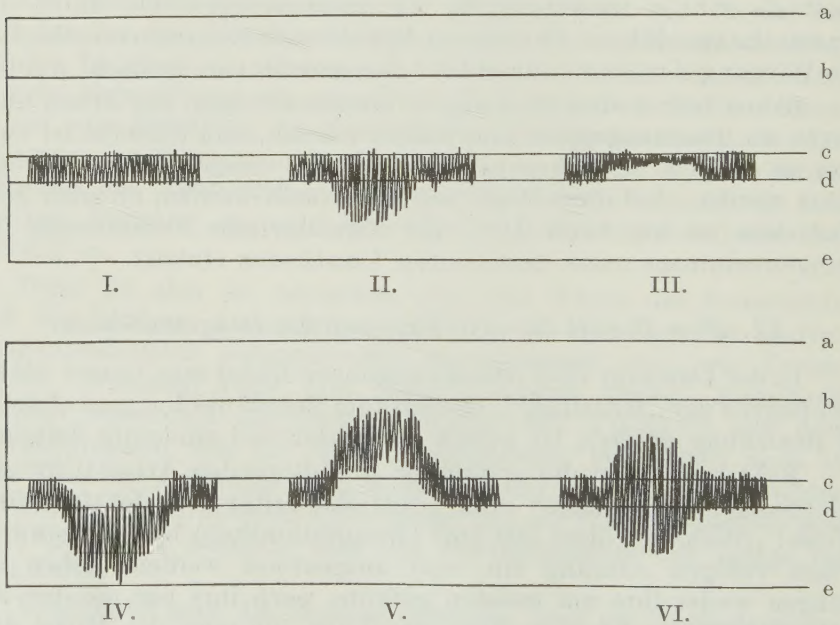

Abb. 1, I—VI.

a—b = Residualluft ca. 1200 cm³.
b—c = Reserveluft ca. 1600 cm³.
c—d = Respirationsluft ca. 500 cm³.
d—e = Komplementärluft ca. 1600 cm³.
a—c = (bei Normalatmung, siehe I.) Residualluft + Reserveluft = Mittelkapazität *(Bohr)* = Lungenvolumen *(Verzár)*.

In II vertieft sich die Atmung. Die Mittelkapazität, d. h. die Reserve- plus Residualluft, bleibt unverändert, die nach *Bass* definierte Mittellage zeigt jedoch eine Vergrösserung.

In III wird die Atmung verflacht, die sogenannte Mittellage verschiebt sich, während die Mittelkapazität wieder unverändert bleibt.

In IV steigen die Atemtiefe und auch die Mittelkapazität. Auch die sogenannte Mittellage verschiebt sich, jedoch mehr als die Mittelkapazität.

Ein umgekehrtes Verhalten von sogenannter Mittellage und Mittelkapazität zeigt V.

Eine letzte Möglichkeit zeigt VI, wobei die Mittelkapazität abnimmt, die sogenannte Mittellage aber gleich bleibt. Hier vertieft sich die Atmung derart, dass ein Teil der Komplementärluft und ein Teil der Reserveluft in die Durchlüftung einbezogen wird.

Aus diesen Ausführungen wird klar, dass die nach *Bass* definierte Mittellage in keinem direkten Zusammenhang mit der Mittelkapazität steht. Die vitale Mittellage *Bohr*'s dagegen ist der Ausdruck der Summe aus Residual- und Reserveluft.

Im Anschluss an *Verzár*[7]) ersetzen wir deshalb die Bezeichnung Mittelkapazität, um das bei der Betrachtung von plethysmographisch gewonnenen Atmungskurven immer irreführende Wort „Mittel" zu umgehen. Wir bezeichnen die Summe aus Residual- und Reserveluft mit dem Begriff Lungenvolumen. Nach dieser Nomenklatur ist dieses identisch mit der Luftmenge, welche nach normaler Exspiration in der Lunge bleibt.

Daneben benützen wir hier gelegentlich noch den Ausdruck „Gesamtlungenvolumen". Es ist das die Luftmenge in der Lunge auf der Höhe einer Inspiration. Bei maximaler Inspiration wäre das also die Summe der Residual-, Reserve-, Respiration- und Komplementärluft.

Zu der Analyse von Thorakographenkurven ist bezüglich der Verwendung des Begriffs der Mittellage das Folgende zu sagen: Hier ist die Atmungskurve kein direktes Mass des Lungenvolumens. Es wäre denkbar, dass z. B. die mit dem Thorakographen registrierte Thoraxatmung abnimmt, während gleichzeitig die Bauchatmung durch die Zwerchfellbewegungen vergrössert wird. Dabei könnte das Lungenvolumen gleich bleiben oder auch grösser oder kleiner werden. Es würde sich in solchen Fällen der Atemtypus ändern können, ohne dass das Lungenvolumen sich ändern müsste. Es ist aber durchaus nicht wahrscheinlich, dass z. B. bei körperlicher Arbeit eine Lungenvolumzunahme, welche sich durch eine Thoraxerweiterung zeigen würde, durch einen gleichzeitigen exspiratorischen Hochstand des Zwerchfelles nur eine scheinbare wäre.

Thorax- und Zwerchfellatmung gehen gewöhnlich gekoppelt. Abgesehen von ganz besonderen pathologischen Fällen wird deshalb

im allgemeinen einer Erhöhung der Lage bei Exspiration im Thorakogramm tatsächlich eine Volumvergrösserung der Lunge entsprechen. Allerdings bleibt ein Thorakogramm immer nur ein indirekter Beweis, während das Körperplethysmogramm ein direkter Beweis der Lungenvolumänderung ist.

Im Interesse einer einheitlichen Darstellung bezeichnen wir deshalb auch im Thorakogramm die Lage des Thorax bei der Exspiration als Mittellage und nicht die Stellung zwischen In- und Exspiration. Alles was in Abbildung 1 über die Formen des Körperplethysmogramms gesagt ist, gilt ebenso auch für das Thorakogramm.

III. Methodik der Körperplethysmographie zur Einatmung verschiedener Gase (s. Abb. 2).

Die Versuchsperson (Vpn.) sitzt in einem zylindrischen Kessel aus Eisenblech von 150 cm Höhe und 70 cm Durchmesser. Der Deckel des Kessels besteht aus zwei halbkreisförmigen Platten, deren eine abschraubbar ist und die in der Mitte zwischen sich eine ovale Öffnung für den Hals der Vpn. freilassen.

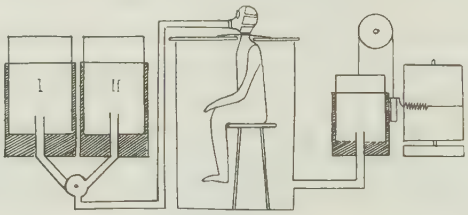

Abb. 2.

Diese Öffnung wird in der Weise abgedichtet, dass man der Vpn. zwei in der Mitte durchlochte und ihrem Hals in einem breiten Streifen anliegende Gummiplatten über den Kopf zieht und deren Ränder auf dem Kesseldach mit einem ringförmigen Eisenstück fixiert.

Die abnehmbare Deckplatte, die den Einstieg in den Kessel ermöglicht, ist mit Gummidichtungen angeschraubt. Das Kesselinnere, also ein abgeschlossenes Luftvolumen, ist durch eine Bohrung in der Kesselwand und einen weiten Gummischlauch mit einem 6-Liter-Spirometer verbunden, das jede Volumänderung dieses abgeschlossenen Luftvolumens mittels eines Schreibers auf einem Kymographion registriert, auf das gleichzeitig die Zeit in 6 Sekunden-Intervallen markiert wird.

Die Vpn. atmet durch eine Gasmaske (Schweiz. Zivilmaske Typ. C). Diese ist durch einen langen Gasmaskenschlauch normaler Weite über einen Dreiweghahn mit zwei grossen Spirometern von 100 bzw. 65 Liter Inhalt verbunden.

In dem einen Spirometer (I) befindet sich Frischluft, während das andere (II) die verschiedenen Luftgemische enthält. Die Umschaltung vom einen auf das andere Spirometer erfolgt durch Drehungen des Dreiweghahnes. Beide Spirometer stehen unter einem Druck von 5 mm Wasser. Um während der Versuche die Herztätigkeit der Vpn. fortlaufend überwachen zu können, wurden zwei weitere Bohrungen in der Kesselwand angebracht, durch die zwei Drähte das EKG aus Ableitung I einem Siemens-Electrocardiographen übermitteln.

Der Kessel besitzt noch eine Öffnung, in welche ein Thermometer zur Kontrolle der Kesseltemperatur eingepasst ist.

Inspiriert die Vpn., so wird durch die Vergrösserung des Thorax Luft aus dem Kessel verdrängt, das Registrierspirometer steigt, der Schreiber sinkt und umgekehrt. Registriert werden auf diese Weise 1. die einzelnen Atemzüge und 2. Änderungen des Körpervolumens der Versuchsperson, die eine Funktion der Lungenvolumänderungen sind, und die sich darin zeigen, dass bei Zunahme desselben das Niveau der Atemkurve fällt, bei Abnahme steigt.

Da bekanntlich Haltungswechsel der Vpn., sowie akustische und optische Reize die Atmungsform des Menschen verändern können, ist es unbedingt notwendig, dass die Vpn. ruhig sitzt und dass nichts ihre Aufmerksamkeit erregt. Das letztere wird dadurch erreicht, dass das Blickfeld der Vpn. durch einen Paravent eingeschränkt wird und dass der ganze Versuch lautlos vor sich geht.

Störend einwirken können alle Faktoren, die das abgeschlossene Luftvolumen in irgendeiner Form beeinflussen.

Das sind vor allem, wie schon erwähnt, Temperaturschwankungen. Hat die Vpn. im Kessel Platz genommen, so erwärmt sich das abgeschlossene Luftvolumen so lange, bis die Wärmeabgabe durch den Kessel nach aussen gleich ist der Wärmeproduktion durch die Vpn. Um diesen Ausgleich zu beschleunigen, wird der Kessel vor dem Versuch durch einen elektrischen Strahler von aussen kurz angewärmt. Aus dem Verlauf der Kurve der Ruheatmung ist zu erkennen, wann die Temperaturkonstanz erreicht ist. Ist dies der Fall, so verläuft die Kurve dauernd horizontal. Dann erst darf mit den Versuchen begonnen werden. In zahlreichen Kontrollversuchen zeigte es sich, dass dieKesselinnentemperatur für die Dauer eines längeren Versuches leicht konstant gehalten werden kann.

Es wäre denkbar, dass eine rasche Entwicklung von Darmgasen während der Versuche unsere Voraussetzung, jede Körpervolumenzunahme als Lungenvolumzunahme anzusehen, verunmöglichen könnte. Aber eine solche rasche Gasbildung, — falls sie überhaupt vorkommt —, könnte unmöglich eine Lungenvolumerweiterungsreaktion vortäuschen. Auch der Austritt der Gase aus dem Körper hat keine wesentlichen Folgen, denn falls sich ihr Volumen beim Austritt durch die Differenz der Temperatur im Körper und im Kessel leicht vermindert, so wird es durch die Druckdifferenz etwas erhöht, so dass die Änderungen praktisch wohl unwesentlich sind.

IV. Versuche.

A) Plethysmographische Untersuchungen des Lungenvolumens.

Mit der oben beschriebenen Methodik wurden Versuche an ruhenden Menschen gemacht, um den Einfluss von vermindertem O_2-Gehalt der Atemluft einerseits und CO_2-Anhäufung andererseits zu studieren. Nachdem solche Versuche aber nur mit Benützung einer Gasmaske gemacht werden konnten, wurde es notwendig, die Veränderungen der Atmung durch die Gasmaske selbst noch besonders zu untersuchen. Die Versuchsresultate werden anhand der Plethysmographenkurven erklärt und sind ausserdem tabellarisch zusammengefasst. Zum Verständnis der Kurven muss das Folgende gesagt werden.

1. Berechnung der Atemfrequenz: Bei Versuchen mit einer Dauer von mehr als 1 Minute wurde die Zahl der Atemzüge in der zweiten Minute nach Änderung der Atmungsbedingungen (Gasmaske,

Mischluft) bestimmt. In einzelnen Versuchen, in welchen die Versuchsdauer kürzer als eine Minute war, wurde die Auszählung nach 30 Sekunden vorgenommen.

2. Atemtiefe: Während derselben Periode wurde die Tiefe aller Atemzüge auf der Plethysmographenkurve addiert und durch die Zahl der Atemzüge dividiert. Die so erhaltene Atemtiefe stellt demnach einen Mittelwert dar.

3. Minutenvolumen: Dieser Wert errechnet sich aus der Multiplikation der Frequenz mit der mittleren Atemtiefe.

4. Lungenvolumen: Die Lungenvolumänderung wird bestimmt aus der Differenz zwischen den Exspirationsstellungen vor und nach Eintritt der Änderung der Atmungsbedingungen.

5. Gesamtlungenvolumzunahme: Diese errechnet sich aus der Differenz der Exspirationsstellung vor und der Inspirationsstellung nach Veränderung der Atmungsbedingungen.

Die Versuche wurden an 11 gesunden und kräftigen Männern im Alter von 21 bis 35 Jahren durchgeführt. (Medizinstudenten und Mitglieder von Luftschutztruppen.) Ihre Daten sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1.

Vpn.	K'länge cm	K'gewicht kg *	Brustumfang exsp. cm	Brustumfang insp. cm	Vitalkap. Liter
A	180	72,5	86	94	5,1
B	167	66,5	76	83	4,2
C	179	68,7	86	96	5,6
D	180	64,5	86	92	4,9
E	170	60,5	79	85	4,3
F	187	79,9	89	99	5,7
G	186	78,5	87	95	5,2
H	174	68,0	87	101	5,7
I	175	67,5	82	90	4,6
K	173	67,7	81	87	4,2
L	172	70,5	79	85	4,1

* Mit Kleider gewogen. Für die Kleider müssen ca. 1500 g in Abzug gebracht werden.

a) Versuche über die Wirkung der Gasmaske auf die Atmung.

Es ist bekannt, dass die Gasmaske die Atmung beeinflusst. Über die Wirkung der schweizerischen Zivilgasmaske auf die Atmung liegen bereits Untersuchungen vor, vor allem die von *Guckelberger*[20]), der uns sein Manuskript[21]) freundlichst zur Verfügung gestellt hat. Allerdings sind diese Untersuchungen mit Filter gemacht und beziehen sich auf andere Gesichtspunkte als unsere. *Guckelberger* hat

besonders den Sauerstoffverbrauch, die Kohlensäureausscheidung, die Atemfrequenz, das Atemminutenvolumen und das sogenannte Atemäquivalent bestimmt, was mit Hilfe des Knipping'schen Kreislaufstoffwechselapparates durchgeführt wurde.

An 6 Versuchspersonen ergaben sich recht schwankende Werte bezüglich der Atemfrequenz; konstant war jedoch die Zunahme des Atemminutenvolumens. Die Untersuchungen dienten besonders praktischen Zwecken. Das uns interessierende Problem über eventl. Änderungen des Lungenvolumens wurde auch berührt. Es wird darauf hingewiesen, dass die Atmungsbehinderung durch Abnahme der Vitalkapazität infolge Verminderung der Komplementärluft steigen könnte. In Tabelle 6 werden die Lungenvolumina angegeben und dabei keine Veränderungen der sogenannten Totalkapazität gesehen. Dagegen ändert sich in seinen Bestimmungen die sogenannte Normalkapazität (Reserve- und Residualluft), weil die Reserveluft um 100—600 cm^3 zunimmt.

Verschiedene dieser Resultate finden sich niedergelegt in der Dissertation von *Stucky*[22]).

Ferner besitzen wir eine Untersuchung von *von Tavel*[23]). Sie behandelt die physiologischen Grundlagen und die Bestimmung der Atmungsarbeit, die bei Verwendung einer Maske durch den Widerstand der Ventile und des Filters vergrössert ist.

Durch die Vorschaltung einer Gasmaske kann die Atmung beeinflusst werden 1. durch die qualitative Veränderung der Atmungsluft infolge der Vergrösserung des toten Raumes. Bei der von uns benützten schweizerischen Zivilgasmaske betrug diese ca. 330 cm^3. Diesen Wert habe ich durch Ausgiessen der aufgesetzten Maske mit Wasser gewonnen. Dies hat zur Folge, dass 330 cm^3 der Einatmungsluft aus verbrauchter Luft bestehen. Das zur Einatmung gelangende Luftgemisch weist also sowohl einen geringeren Sauerstoffgehalt, wie auch einen erhöhten Kohlensäuregehalt auf.

2. Durch die Maskenventile wird (auch wenn kein Filter benützt wird) eine Widerstandserhöhung zustande kommen. Wir haben sie gemessen, indem wir den Maskeninnenraum mit einem Wassermanometer verbanden. Der inspiratorische Druck betrug bei unserer Gasmaske ohne Filter und Schlauch – 5 mm H_2O. Benützt man die lange Schlauchleitung zu den Spirometern, so steigt er auf – 6 mm H_2O. Wird dann eines der grossen Spirometer, dessen Glocke nahezu im Gleichgewicht steht, angeschlossen, dann steigt der Druck auf - 10 mm H_2O. Um diesen Widerstandsanstieg durch Zuleitung und Spirometer auszugleichen, wurden beide Spirometer unter einen Überdruck von + 5 mm H_2O gesetzt. Schlussendlich betrug deshalb der inspiratorische Druck sowohl direkt aus dem Freien wie aus den Spirometern – 5 mm H_2O.

Der exspiratorische Druck, welcher durch das Ausatmungsventil der Gasmaske bedingt ist, war konstant + 2 mm H_2O.

Diese Widerstände sind gering. Nach *Matthes*[24]) beträgt die kleinste Doppelstenose, (= Differenz zwischen Druck bei Inspiration und Exspiration) die die Atmung überhaupt sichtbar beeinflusst, 42 mm H_2O. Bei uns ist dieser Wert von − 5 bis + 2, also 7 mm H_2O.

3. Veränderungen der Atmung unter der Gasmaske durch psychische Faktoren sind umso stärker, je ungewohnter der Versuch für die betreffende Person ist. Es scheint daher unerlässlich, die maskentrainierten Versuchspersonen von den maskenuntrainierten bei der Bewertung der Ergebnisse zu trennen.

Wir registrierten den Verlauf der Atmungskurven vor und nach dem Aufsetzen der Maske. Diese wurde ohne Schlauch und Filter benützt.

Die Versuchsresultate sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2.

Vpn.	Masken-gewöhnt	Frequenzändg. pro Minute			Atemvolumändg.			Min.-volumändg.			Lungen-volum-änderung
		von	auf	in %	von cm^3	auf cm^3	in %	von L	auf L	in %	
D	−	16	14	−12	357	570	+ 60	5,71	7,98	+40	0
F	+	19	13	−32	427	607	+ 42	8,11	7,89	− 3	0
G	−	23	17	−26	407	607	+ 49	9,36	10,32	+10	70
H	−	12	7	−42	570	1142	+100	6,84	7,99	+17	1070
L	+	16	11	−31	427	714	+ 67	6,83	7,85	+15	0
A	+	14	15	+ 7	392	500	+ 27	5,49	7.50	+37	0
B	+	14	19	+36	427	500	+ 17	5,98	9,50	+59	0
		16	22	+38	357	430	+ 20	5,71	9,46	+66	107
		15	18	+20	357	430	+ 20	5,35	7,74	+45	107
C	+	11	13	+18	427	607	+ 42	4,70	7,89	+68	0
E	−	14	16	+14	357	500	+ 40	5,00	8,00	+60	0
I	−	15	16	+ 6	427	642	+ 50	6,41	10,27	+60	0
K	+	16	25	+56	427	500	+ 17	6,83	12,50	+83	0

Bei allen Versuchspersonen hat sich die Atmung unter der Gasmaske wesentlich geändert, jedoch sind ähnlich wie bei andern Autoren auch hier die Veränderungen sehr ungleich.

Frequenz: Von den 6 maskengewohnten Versuchspersonen zeigten 4 eine Zu- und 2 eine Abnahme. Von den 5 maskenungewohnten Personen zeigten 2 eine Zu- und 3 eine Abnahme. Die Zunahmen betrugen 6 bis 56 %, die Abnahmen 12 bis 42 %.

Atemtiefe: Diese vergrösserte sich bei allen Versuchspersonen deutlich und zwar um 17 bis 100 %, im Mittel 42 %. Dabei zeigt sich die Korrelation zwischen Atemtiefe und Atemfrequenz insofern, als

bei Versuchspersonen, die eine erhebliche Frequenzabnahme hatten, die Atemtiefe sich wesentlich erhöhte.

Atemminutenvolumen: 10 Versuchspersonen von 11 zeigten unter der Gasmaske ein erhöhtes Minutenvolumen. Die Versuchsperson F, die auch in andern Versuchen ein abweichendes Verhalten zeigte (siehe später), weist eine Abnahme um 3 % auf.

Die Werte, um die sich das Minutenvolumen erhöht, sind besonders bei jenen Versuchspersonen gross, die auch eine Zunahme der Frequenz zeigen. Sie betragen hier 37 bis 83 %, wo nur die Tiefe zunimmt 10 bis 40 %. Die durchschnittliche Zunahme aus allen Versuchen (ohne F) ist + 47 %.

Lungenvolumen: Nur bei 3 Versuchspersonen hat die Gasmaske eine Zunahme des Lungenvolumens verursacht. Bei B vergrösserte es sich in 2 von 3 Versuchen um ca. 100 cm^3 sofort nach Aufsetzen der Maske. Bei G betrug die Vergrösserung im einzigen Versuch etwa 70 cm^3. Beide Werte sind nicht wesentlich. Dagegen zeigte der maskenuntrainierte H eine deutliche und zugleich eigenartige Reaktion. Bei Abnahme der Frequenz von 12 auf 7 Atemzüge und bei Zunahme der Atemtiefe um 100 %, nahm das Lungenvolumen sehr akut um ca. 1000 cm^3 zu. Nach wenigen Atemzügen kehrte es aber wieder zur Ausgangslage zurück. Auch in den Versuchen mit O_2-Mangel und CO_2-Anreicherung zeigte H eine grosse Labilität im Verhalten des Lungenvolumens.

Demnach verändert die Gasmaske (ohne Filter) die Atemfrequenz, das Atemvolumen und insbesondere das Minutenvolumen. Eine Änderung des Lungenvolumens in massgebender Weise fehlt bei der Mehrzahl der Versuchspersonen. Dieses Resultat steht in Übereinstimmung mit dem von *Guckelberger*[21]), insbesondere dessen Tabelle 6 „Normalkapazität". Es steht aber in Widerspruch mit seinen Angaben über Totalkapazität, deren Bestimmung mit der Knipping-Methode wahrscheinlich nicht so exakt geschehen kann wie mit der plethysmographischen.

Weder die maskentrainierten, noch die maskenuntrainierten Versuchspersonen verhalten sich einheitlich. Insbesondere lässt sich beobachten, dass die sogenannte „disziplinierte Atmung", die nach *Herbst*[25]) in einer Abnahme der Frequenz und in einer Zunahme der Atemtiefe besteht und die vor allem bei maskentrainierten Personen zu erwarten wäre, auch spontan bei solchen Personen auftritt, die zum ersten Male eine Maske tragen und umgekehrt bei einer Anzahl von maskentrainierten Personen vermisst wird. Sie trat auf bei 3 von 5 untrainierten und bei 2 von 6 trainierten Personen.

Die beschriebenen Atmungsänderungen der Versuchspersonen haben für uns nur die Bedeutung, dass sie als Ausgangslage für die Versuche mit Sauerstoffmangel und Kohlensäureanreicherung gelten, bei welchen die Gasmaske getragen wurde.

b) Wirkung von Sauerstoffmangel.

Nachdem die normale Atmung mit aufgesetzter Maske registriert wurde, erhielt die Versuchsperson ein durch Verdünnung mit Stickstoff hergestelltes Luftgemisch. Bei Versuchsperson A und B wurde bei 15, 10 und 7 % Sauerstoff untersucht. Bei den übrigen nur bei 7 % O_2.

Der Versuchsverlauf war der folgende: Die Versuchsperson atmet während längerer Zeit gewöhnliche Luft aus Spirometer 1; wenn die Kurve der Atmung auf dem Kymographion horizontal verläuft als Zeichen dafür, dass alle Verhältnisse, speziell auch die Temperatur, konstant sind, wird, ohne dass die Versuchsperson es merkt, der Dreiwegehahn so gedreht, dass nun aus dem zweiten Gasometer Mischluft geatmet wird. An 11 Versuchspersonen wurden insgesamt 26 Versuche gemacht. Die Resultate sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Zwecks Raumersparnis führe ich nur eine Auswahl der dazugehörenden Plethysmographenkurven als Belege an (Abb. 3—9).

Frequenz: Bei den Versuchspersonen A und B zeigt sich bei 15 % und 10 % O_2 keine wesentliche Frequenzzunahme. Senkt man den Sauerstoffgehalt dagegen auf 7 %, so ist bei allen Versuchspersonen eine Frequenzsteigerung von 4 bis 43 % zu beobachten. Jene Versuchspersonen, die allein durch die Gasmaske eine Frequenzabnahme zeigten (H, F, L, G, D), zeigen eine grössere Frequenzzunahme als die übrigen. Die durchschnittliche Frequenzzunahme in allen Versuchen mit 7 % O_2 beträgt 17 %.

Atemtiefe: Diese ändert sich in allen Versuchen. Bei den Versuchspersonen A und B nimmt das Atemvolumen mit der Abnahme des Sauerstoffdruckes ab. Bei A bei 15 % O_2 50 %, bei 10 % O_2 61 % und bei 7 % O_2 107 % Zunahme vom Ausgangswert. Versuchsperson B zeigt ein ähnliches Verhalten, eine Zunahme von 25 %, 63 % bzw. 100 %. Allerdings hat die Atemvolumzunahme bei 7 % O_2 in 6 verschiedenen Versuchen zwischen 43 und 100 % gewechselt.

Die Zunahme der Atemtiefe ist auch bei allen andern Versuchspersonen bei 7 % O_2 vorhanden und schwankt zwischen 14 und 107 %; im Mittel beträgt sie 71 %.

Atem-Minutenvolumen: Das Minutenvolumen steigt bei fallendem Sauerstoffgehalt der Atmungsluft. Versuchsperson A gab bei 15 % O_2 bereits eine Steigerung um 50 %, bei 10 % Sauerstoff eine solche um 61 %, bei 7 % O_2 von 135 %. Bei Versuchsperson B sind die entsprechenden Werte 33 %, 64 % und 142 % an ein- und demselben Tag. Mit 7 % wurde der letzte Wert bei Versuchsperson B nie mehr erreicht, sondern schwankte zwischen 49 und 104 % an andern Tagen. Bei den übrigen Versuchspersonen war die Zunahme mit 7 % O_2 61 bis 146 %.

Tabelle 3.

O_2%	Vers. No.	Vpn.	Frequenzzunahme von	auf	in %	Atemvolumzunahme L von	auf	in %	Min.-volumänderung L von	auf	in %	Lungenvolumänderung cm^3
15	1	A	18	18	0	500	750	50	9,00	13,50	50	0
	4	B	17	18	6	570	714	25	9,69	12,85	33	0
10	2	A	17	17	0	465	750	61	7,91	12,75	61	430
	5	B	19	19	0	392	642	63	7,45	12,20	64	214
7	3	A	15	17	13	500	1035	107	7,50	17,59	135	642
	6	B	19	23	21	500	1000	100	9,50	23,00	142	214
	7	B	22	23	5	500	714	43	11,00	16,42	49	285
	8	B	21	22	5	500	965	93	10,50	21,23	102	285
	9	B	18	20	11	427	785	84	7,69	15,70	104	285
	10	B	18	19	6	427	785	84	7,69	14,92	94	214
	11	B	22	23	5	427	714	67	9,39	16,42	74	178
	12	C	13	15	15	607	892	47	7,89	13,38	69	322
	13	L	11	13	18	714	1430	100	7,85	18,59	137	392
	14	L	11	13	18	714	1430	100	7,85	18,59	137	322
	15	L	11	12	9	678	1250	84	7,46	15,00	101	357
	16	D	14	18	29	570	1000	75	7,98	18,00	125	107
	17	E	16	20	25	500	785	57	8,00	15,70	96	178
	18	F	13	17	31	607	1142	88	7,89	19,43	146	0
	19	F	13	15	15	714	1321	85	9,28	19,82	114	0
	20	G	17	23	35	607	785	29	10,32	18,06	75	357
	21	G	17	24	41	500	570	14	8,50	13,68	61	500
	22	H	7	10	43	1142	1678	47	7,99	16,78	110	1250
	23	I	16	17	6	642	1000	56	10,27	17,00	66	0
	24	I	17	18	6	465	785	69	7,91	14,13	79	0
	25	K	25	26	4	500	821	64	12,50	21,35	71	178
	26	K	27	28	4	500	821	64	13,50	22,99	70	285
Versuche mit 7% O_2			Mittel +17%					+71%			+98%	+300 cm^3 *)

*) Ohne Versuch Nr. 22, 23, 24.

Es ist klar, dass die Erhöhung des Minutenvolumens vor allem durch die Zunahme der Atemtiefe bedingt ist, und wir können zusammenfassend also sagen, dass bei akuter Verminderung des O_2-Gehaltes der Atemluft auf 7% O_2 eine Frequenzzunahme im Mittel von 17%, eine Vertiefung des Atemvolumens von 71% und eine Vermehrung des Minutenvolumens um 98% eintritt.

Lungenvolumen: Über den Einfluss des Sauerstoffmangels auf das Lungenvolumen lässt sich das Folgende sagen: Die beiden Versuchspersonen A und B zeigen bei 15% Sauerstoff gar keine Veränderung, dagegen bei 10% O_2 eine Vermehrung des Lungenvolumens um 430 bzw. 214 cm^3. Bei 7% O_2 reagieren von 11 Versuchspersonen

9 in insgesamt 18 Versuchen deutlich mit einer Lungenvolumzunahme. Diese zeigt ebenfalls grosse individuelle Verschiedenheiten und schwankt zwischen 107 und 1250 cm³. Zwei Versuchspersonen (F und J) lassen in je 2 Versuchen eine Vergrösserung der Lungenvolumina vermissen. Zählt man den nur einmal erreichten extremen Wert von H (1250 cm³) nicht mit, so beträgt der durchschnittliche Wert der Steigerung bei 8 Versuchspersonen 300 cm³.

Besser als aus der Tabelle 3 lässt sich diese Veränderung des Lungenvolumens bei akuter Umschaltung auf ein Luftgemisch mit 7 % Sauerstoff aus den Atemkurven des Körperplethysmographen ablesen. Bei Zunahme des Lungenvolumens sinkt das Niveau der Atmungskurven, wie dies in Abschnitt III ausgeführt wurde. Die Mischluft wurde in der Zeit zwischen den Markierungen geatmet. In Abb. 3, 4, 5 sieht man bei Versuchsperson A die zunehmende Wirkung bei 15, 10 und 7 % O_2. Bei 7 % O_2 hat die Versuchsperson nach 3,3 Minuten „Unwohlsein" signalisiert. Sie hatte Kopfschmerzen, und der Versuch wurde abgebrochen. Man sieht auf den Kurven, dass die Volumzunahme nach Umschaltung auf gewöhnliche Luft, — was immer ohne Wissen der Versuchsperson geschah, — sogleich wieder zurückgeht. In Versuch Nr. 3 betrug die Lungenvolumzunahme 640 cm³. Nachdem die Atmung sich auch vertieft, beträgt die „Gesamtvolumzunahme" auf der Höhe der Inspiration etwa 1500 cm³.

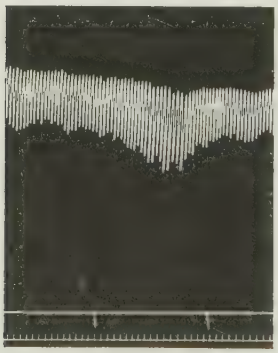

Abb. 3.
Versuch Nr. 1. Vpn. A, 15% O_2. — Keine Veränderung des Lungenvolumens.

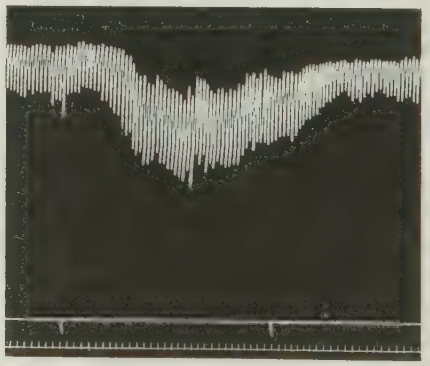

Abb. 4.
Versuch Nr. 2. Vpn. A, 10% O_2. — Unter langsamer Zunahme der Atemtiefe erfolgt eine Vergrösserung des Lungenvolumens um ca. 430 cm³. Nach Rückschaltung auf frische Luft Rückbildung d. Vergrösserung.

Bei der Versuchsperson B waren die Volumveränderungen weniger ausgesprochen. Die Atmung dieser Versuchsperson ist durch tiefe In- und Exspirationen gestört.

Von den Versuchen der übrigen Versuchspersonen seien die folgenden Beispiele bei Atmung von 7 % O_2 angeführt, die verschiedene Typen der Reaktion zeigen. Versuchsperson C (Abbildung 6) reagiert rasch und deutlich mit Volumzunahme, und die Reaktion geht auch rasch vorüber, wenn wieder Normalluft geatmet wird.

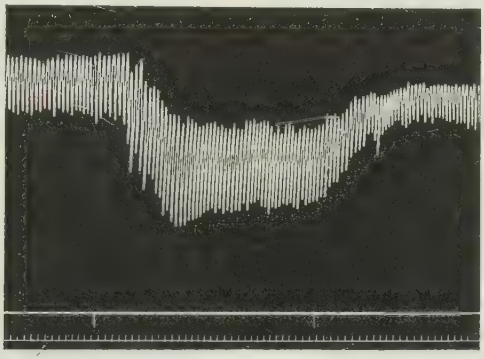

Abb. 5.

Versuch Nr. 3. Vpn. A, 7% O_2. — Die Vpn. reagiert im gleichen Sinne, jedoch entsprechend verstärkt. Das Lungenvolumen erhöht sich um ca. 640 cm³.

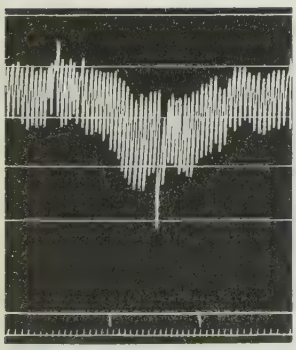

Abb. 6.

Versuch Nr. 12. Vpn. C, 7% O_2. — Deutliche Zunahme des Lungenvolumens um ca. 320 cm³. Rasche Rückkehr zur Ausgangslage bei Frischluftzufuhr.

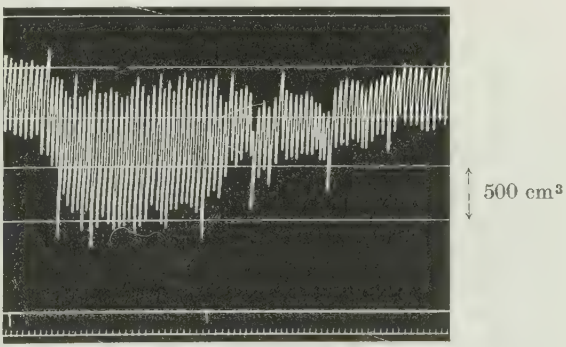

Abb. 7.

Versuch Nr. 14. Vpn. L, 7% O_2. — Bei starker Zunahme der Atemtiefe bildet sich ein etwas schwankendes, vergrössertes Lungenvolumen aus, welches erst 3 Minuten nach Umschaltung auf Frischluft sich der Ausgangslage wieder nähert.

Bei Versuchsperson L (Abbildung 7) tritt die Volumvergrösserung zwar auch rasch ein, geht aber relativ langsam zurück.

Bei Versuchsperson I (Abbildung 8, 9) ist an zwei verschiedenen Tagen keine Volumenänderung zu bemerken, ähnlich bei F. Bei der Versuchsperson G wurden, ebenfalls an zwei verschiedenen Tagen, jedesmal nach Ausbildung der Volumvergrösserung einige kräftige Exspirationen registriert; nach diesen erfolgte aber doch eine Zunahme des Lungenvolumens.

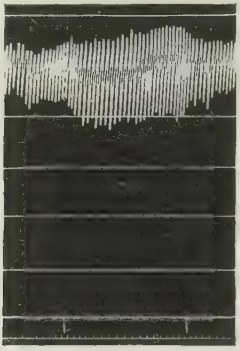

Abb. 8.
Versuch Nr. 23. Vpn. I, 7% O_2. — Keine Veränderung des Lungenvolumens.

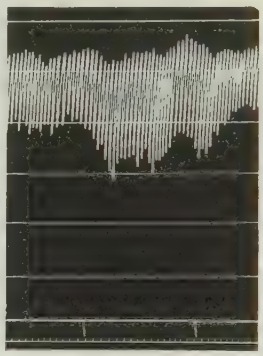

Abb. 9.
Versuch Nr. 24. Vpn. I, 7% O_2. — Bei einem weiteren Versuch mit derselben Vpn. an einem anderen Tag gleichfalls keine Lungenvolumzunahme.

c) Wirkung von Kohlensäureanreicherung in der Atemluft.

Ich untersuchte die Wirkung von Luftgemischen mit einem Kohlensäuregehalt von 7,5% und 10% CO_2. Die Versuchsanordnung war die gleiche wie bei den Versuchen mit Sauerstoffmangel. Die Versuchsdauer musste jedoch individuell verschieden gehalten werden, weil die einzelnen Versuchspersonen sehr verschieden auf die Kohlensäure reagieren. Oft mussten die Versuche wegen Kopfschmerzen und Übelkeit abgebrochen werden.

An 11 Versuchspersonen wurden insgesamt 17 Versuche gemacht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt und einige Kurven als Beispiele in den Abbildungen 10–13 dargestellt.

Frequenz: Sie ändert sich bei 7,5% Kohlensäure und ebenso bei 10% Kohlensäure sehr unregelmässig. Manche Personen zeigen keine Änderung, andere eine Frequenzzunahme.

Atemtiefe: Die Atemtiefe ändert sich in allen Versuchen sehr bedeutend. Bei 7,5% CO_2 findet man Zunahmen von 50—167%, durchschnittlich + 95%; bei 10% CO_2 ist die Erhöhung 85—251%, im Mittel 197%.

Minutenvolumen: Dieses ist in allen Versuchen deutlich gesteigert. Die Erhöhung beträgt bei 7,5 % CO_2 67—234 %, im Mittel 116 %, bei 10 % CO_2 110—275 %, im Mittel aus 6 Versuchen 213 %. Die Zunahme beruht im Wesentlichen auf der Vertiefung der Atmung.

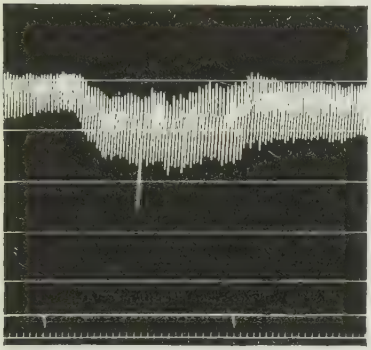

Abb. 10.

Versuch Nr. 29. Vpn. B, 7 ½ % CO_2. – Geringe Zunahme des Lungenvolumens um ca. 214 cm³. Die Ausgangslage wird bei Frischluftatmung nur für kurze Zeit wieder erreicht.

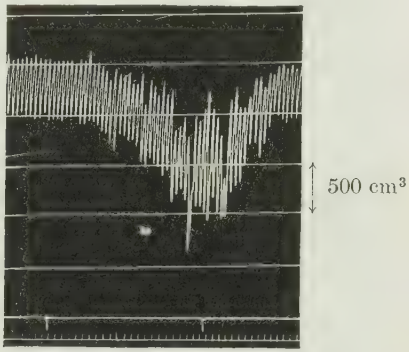

Abb. 11.

Versuch Nr. 30. Vpn. C, 7 ½ % CO_2. – Die Zunahme des Lungenvolumens erfolgt sehr langsam, erreicht jedoch den Wert von 600 cm³. Die unregelmässige Atmung erschwert die genaue Ausmessung. Rasche Rückkehr zur Ausgangslage.

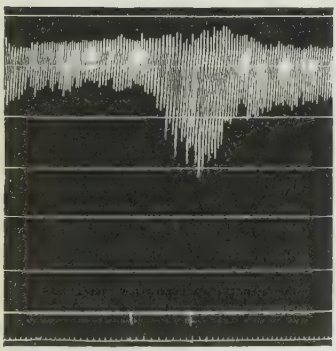

Abb. 12.

Versuch Nr. 34. Vpn. I, 7 ½ % CO_2. — Keine Vergrösserung des Lungenvolumens.

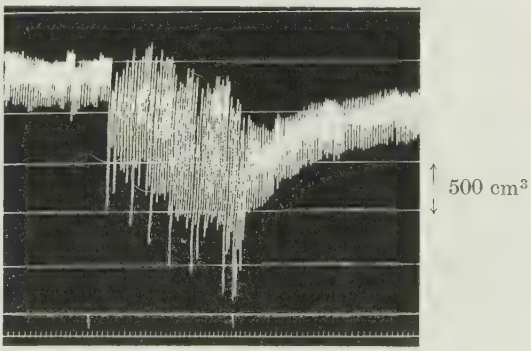

Abb. 13.

Versuch Nr. 38. Vpn. B, 10% CO_2. — Momentane erhebliche Zunahme der Atemtiefe, während das Lungenvolumen langsam zunimmt. Die Ausgangslage wird auch auf dem hier nicht beigefügten Teil der Kurve nicht mehr erreicht.

Tabelle 4.

$CO^{0}/_{0}$	Vers. No.	Vpn.	Frequenzzunahme von	auf	in %	Atemvolumzunahme L von	auf	in %	Min.-volumänderung L von	auf	in %	Lungenvolumänderung cm^3
7½	27	A	15	15	0	570	1142	100	8,55	17,13	100	178
	28		16	18	13	570	1142	100	9,12	20,56	125	214
	29	B	20	20	0	427	714	67	8,54	14,28	67	214
	30	C	15	15	0	500	892	78	7.50	13,38	78	607
	31	F	12	15	25	642	1714	167	7,70	25,71	234	0
	32	G	20	24	20	500	750	50	10,00	18,00	80	286
	33	H	5	7	40	1070	1607	50	5,35	11,25	110	857
	34	I	20	20	0	535	1107	107	10,70	22,14	107	0
	35	L	14	12	–14	570	1142	100	7,98	13,70	72	427
	36		14	17	21	642	1500	134	8,99	25,50	184	500
			Mittel		10%	Mittel		95%	Mittel		116%	410 cm^3
10	37	B	22	22	0	427	1285	201	9,39	28,27	201	893
	38		23	23	0	427	1500	251	9,82	34,50	251	643
	39	D	23	26	13	500	927	85	11,50	24,10	110	285
	40	E*	17	*	*	400	*	*	6,80	*	*	427
	41	I	17	17	0	500	1607	221	8,50	27,32	221	0
	42	K	22	22	0	500	1607	221	11,00	35,35	221	321
	43	F	16	20	25	500	1500	200	8,00	30,00	275	0
			Mittel		0%	Mittel		197%	Mittel		213%	513 cm^3

*) Starke Asphyxie.

Lungenvolumen: Von insgesamt 11 Versuchspersonen zeigten 9 in 13 Versuchen eine Zunahme des Lungenvolumens. Die Werte, um welche sich die Lungenvolumina vergrössern, waren individuell stark verschieden. Sie schwankten zwischen 178 und 893 cm^3. Bei 7,5% CO_2 war der Mittelwert + 410 cm^3, bei 10% CO_2 + 513 cm^3. Bei den Versuchspersonen B, F und I wurde sowohl mit 7,5 als auch mit 10% CO_2 geprüft. Bei B vergrösserte sich mit zunehmender Kohlensäurekonzentration auch das Lungenvolumen. Bei den Versuchspersonen F und I liess sich das aber nicht nachweisen. Die Abbildungen zeigen einige Beispiele. Abbildung 10 bei Versuchsperson B zeigt eine geringe, Abbildung 11 bei Versuchsperson C eine starke Reaktion. Abbildung 12 zeigt, dass bei Versuchsperson I die Reaktion fehlt. Abbildung 13 zeigt bei Versuchsperson B bei 10% CO_2 eine momentane Vertiefung, aber eine erst allmählich sich entwickelnde Volumvergrösserung, die dann auffallend lange überdauert, während das Atemvolumen bereits wieder vermindert ist. Bei einem Versuch an einem andern Tag war das Resultat ganz dasselbe.

B) Versuche mit dem Thorakographen.

Als Ergänzung zu den Untersuchungen mit dem Körperplethysmographen habe ich auch Versuche mit dem Thorakographen von *Verzár*[28]) an 8 Personen gemacht. Die Versuchspersonen waren dieselben. Sie trugen die Gasmaske (ohne Filter) und lagen auf einem Feldbett. Die Maske war mit einem Zuleitungsrohr verbunden, welches auch hier, ohne dass die Versuchsperson es gemerkt hat, von Frischluft auf ein Gasometer umgeschaltet wurde, das entweder 7% Sauerstoff oder 7,5% Kohlensäure enthielt.

Der Thorakograph wird über dem oberen Teil der Brust angelegt. Er registriert automatisch die Erweiterung des Brustkorbes in der Höhe des Manubrium sterni. Seine Konstruktion ist gegenüber dem von *A. Vischer*[18]) in unserem Institut verwendeten, verbessert worden. Insbesondere ist auch die Befestigung am Körper verändert. Der Apparat wird nur leicht um den Hals angelegt; ein doppeltes Metallband befestigt ihn um den Brustkorb. Er ist aus Leichtmetall angefertigt, und die Registrierung geschieht so, dass die Kurve dauernd beobachtbar ist. Aus den Kurven kann man direkt in mm die Thoraxerweiterung bei jedem Atemzug bzw. eine Erhöhung der Mittellage, auf welche sich die Atemzüge superponieren, ablesen. Von den registrierten Thorakogrammen führe ich einige charakteristische Beispiele an. In den Kurven geht Inspiration bzw. Volumzunahme nach unten. Langsame Registrierung.

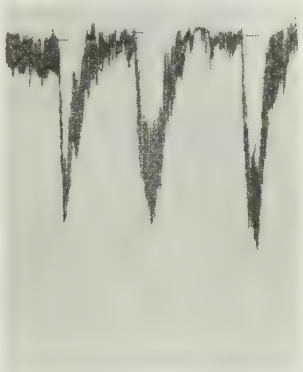

Abb. 14.
Vpn. A.

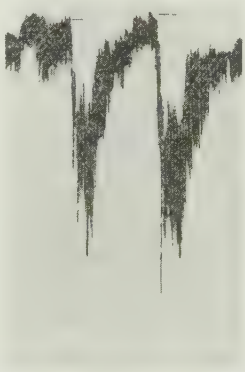

Abb. 15.
Vpn. A.

1 = 7% O_2 2 = 7½% CO_2.

Versuchsperson A zeigt sowohl bei 7% O_2 wie bei 7,5% CO_2 eine starke Thoraxerweiterung. Bei Umschaltung auf Frischluft ist die Rückbildung sehr vollkommen (Abbildung 14 und 15). Auch

Versuchsperson C reagiert mit einer Vergrösserung des Thoraxumfanges. Diese ist bei Versuchsperson D besonders stark bei CO_2-Atmung (Abbildung 16). Versuchsperson E zeigt eine langsam eintretende Thoraxerweiterung bei 7 % O_2 und eine rasch eintretende bei 7,5 % CO_2. In beiden Fällen geht die Reaktion wieder zurück; nach CO_2 ist der Rückgang vollkommener. Versuchsperson B zeigt eine unruhige Ausgangslage; trotzdem lässt sich eine allerdings geringe Volumzunahme bemerken. Versuchsperson G zeigt ebenfalls eine unruhige Ausgangslage, auf welche sich aber eine Volumzunahme superponiert. Versuchsperson F, die in den Körperplethysmographversuchen keine Lungenvolumenzunahme zeigte, reagiert auch hier auf O_2-Mangel nicht und auf CO_2-Anreicherung ist ebenfalls eine Erhöhung der Mittellage nur angedeutet, während die Atmung sehr stark vertieft wird (Abbildung 17). Versuchsperson I hat ebenfalls in den plethysmographischen Versuchen keine Lungenvolumenänderungen gezeigt und zeigt auch bei diesen Thorakographenversuchen keine wesentlichen Mittellageänderungen.

1 2

Abb. 16.
Vpn. D.

1 2

Abb. 17.
Vpn. F.

1 = 7% O_2 2 = 7½% CO_2.

Die Vergrösserung des Thoraxumfanges (Mittellage) in der Exspirationsstellung war am stärksten bei der Versuchsperson A, 12–17 mm und bewegte sich in den übrigen Versuchen, falls sie eintrat, zwischen 4–8 mm.

Alle diese Versuche mit dem Thorakographen sind leider technisch nicht einwandfrei, weil die Maske allein schon wesentliche Veränderungen im Atemrhythmus, in der Atemtiefe und manchmal auch in der Mittellage verursacht, auf welche sich die Wirkungen des O_2-Mangels und der CO_2-Anreicherung superponieren. Es ist leider nicht

möglich, diese Fehlerquelle zu umgehen, solange man genötigt ist, derartige Versuche mit der Gasmaske auszuführen. Wir betrachten sie deshalb als vorläufige Ergebnisse, die möglichst ergänzt werden sollten mit Versuchen unter freier Atmung der Gasgemische. Trotzdem lässt sich sagen, dass diese Versuche eine Bestätigung der mit dem Körperplethysmographen gefundenen Befunde sind.

V. Diskussion.

Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass beim Menschen bei Sauerstoffmangel in der Einatmungsluft das Lungenvolumen sich vergrössert, ebenso wie dies in früheren Untersuchungen bei Muskelarbeit nachgewiesen worden war. Nach plötzlicher Umschaltung auf 7 % O_2 tritt die Vergrösserung sehr rasch ein und geht, wenn wieder normale Luft geatmet wird, auch rasch wieder vorüber. Sie geht zusammen mit einer Vergrösserung des Atemminutenvolumens, das hauptsächlich durch Vertiefung der Atmung und weniger durch Vermehrung der Atemzüge erreicht wird.

Damit ist ein weiterer Fall von Zunahme des Lungenvolumens nachgewiesen, der mit einer für die Gasdiffusion zweckmässigen Vergrösserung der respiratorischen Oberfläche einhergeht.

Gegen den Nachweis dieser Reaktion bei Muskelarbeit wurde eingewendet, dass Veränderungen der Körperlage oder eine Erhöhung der Temperatur durch die Arbeit im Plethysmographen das Resultat vorgetäuscht haben könnten. Gegen diese Versuche kann kein solcher Einwand erhoben werden, denn die Versuchspersonen blieben in Ruhe und eine Änderung der Wärmebildung findet natürlich nicht statt. Dazu kommt noch, dass die Reaktion nicht nur mit Plethysmographie, sondern auch mit einer von dieser vollkommen unabhängigen Methode, der Thorakographie, bestätigt wurde. Es sei bemerkt, dass auch die Lungenvolumenzunahme bei Arbeit durch *A. Vischer*[18]) mit Thorakographie bestätigt ist, was die Kritiker[8]) ebenfalls übersehen haben. Es besteht also kein Zweifel an der Realität dieser Beobachtung.

Der andere alte Einwand, der schon *Bohr*[1]) entgegengehalten wurde, die Volumzunahme sei nicht konstant[2])[3])[4]), könnte auch gegen diese Versuche erhoben werden. Von 11 Personen war bei 2 die Reaktion tatsächlich nicht vorhanden. Bei den übrigen schwankte sie zwischen 107 und 1250 cm^3. Wie unberechtigt es aber wäre, daraus schliessen zu wollen, es handle sich nicht um einen gesetzmässigen Regulationsmechanismus, geht daraus hervor, dass auch die andern Faktoren der Atmungsregulation ausserordentlich stark variieren. So hat die Frequenz unter denselben Bedingungen bei verschiedenen Personen von 4—43 %, das Atemvolumen von 22—107 %, das Minutenvolumen von 71—135 % variiert. Diese ausserordentlich

wechselnde individuelle Reaktion der Atmung ist längst bekannt. Trotzdem wird niemand bezweifeln, dass bei Sauerstoffmangel diese Veränderungen zweckmässige Regulationsvorgänge sind. Wir glauben deshalb, dass auch die Zunahme des Lungenvolumens bei Sauerstoffmangel, ebenso wie bei Muskelarbeit, als zweckmässige Reaktion, als ein Regulationsmechanismus zu betrachten ist.

In Tabelle 5 habe ich sämtliche Änderungen an allen Versuchspersonen mit allen uns zur Verfügung stehenden Daten zusammengestellt.

Versucht man eine Erklärung zu finden, warum verschiedene Individuen so verschieden reagieren, so ist besonders zu beachten, dass die Versuchspersonen F und I die Lungenvolumenvergrösserung in keinem Fall weder bei Sauerstoffmangel noch bei CO_2-Anhäufung, und auch nicht, wie oben erwähnt, mit Thorakographie, gezeigt haben. Es gelang uns aber nicht, bei diesen Personen irgend einen konstitutionellen oder krankhaften Zustand festzustellen, der das Fehlen der Reaktion erklären könnte. Man könnte daran denken, dass es sich um Personen mit einem dauernd grossen Thoraxumfang (eventl. Emphysem) handeln könnte, oder um Personen mit hohem Vagustonus. Für beides fehlen Anhaltspunkte. Es wird eine Aufgabe zukünftiger Forschung sein, die Typen der Atmungsreaktion mit Konstitutionsfragen zu korrelieren.

Besondere Besprechung verlangt der Befund, dass bei Umschaltung auf 7 % O_2 enthaltende Luft unsere Versuchspersonen weniger mit Frequenzzunahme, als mit Vertiefung der Atmung reagierten. Erstere hat sich im Mittel um + 17 %, letztere im Mittel um + 71 % vermehrt. Dieses Resultat scheint im Widerspruch zu stehen mit dem von *Fleisch*[26]), der die Atmungsveränderungen in der Unterdruckkammer beobachtet hat. Er arbeitete an 5 Versuchspersonen. Bei einem Barometerdruck von 330 mm Hg, der einem O_2-Gehalt der Luft von ungefähr 9 % entspricht, erhielt er eine durchschnittliche Frequenzzunahme von 38 % und eine Atemvolumzunahme von nur 19,3 %. Das Minutenvolumen vermehrte sich dabei im Mittel um 56 %, was also hauptsächlich durch Frequenzsteigerung bedingt war. Die Versuchsbedingungen sind insofern von den Unsrigen verschieden, als bei uns ein Luft-Stickstoffgemisch geatmet wurde bei normalem Barometerdruck und ferner die Umschaltung momentan geschah. Eventl. findet in der Unterdruckkammer beim allmählichen Fallen des Druckes eine kontinuierliche Anpassung statt. Es wäre unbedingt erwünscht, diese Untersuchungen in einer Unterdruckkammer fortzusetzen, was uns bisher nicht möglich war.

Bei unseren Versuchen sind wir bereits bei Verwendung der Maske auf sehr weitgehende und variable Atmungsveränderungen gestossen. Nur eine Versuchsperson H zeigte eine bedeutende Lungenvolumzunahme, während Atemvolumen und Frequenz, besonders aber

Tabelle 5.

Vpn.	Frequenzänderung in %				Atemvolumänderung in %				Minutenvolumänderung in %				Lungenvolumänderung in cm³				Thoraxerweiterung in mm			Körpermasse der Vpn.				
	M	7% O_2	CO_2-% 7½	CO_2-% 10	M	7% O_2	CO_2-% 7½	CO_2-% 10	M	7% O_2	CO_2-% 7½	CO_2-% 10	M	7% O_2	CO_2-% 7½	CO_2-% 10	M	7% O_2	7½% CO_2	Länge cm	Gewicht gr.	Thorax exsp.	Thorax insp.	Vital K. L
A	7	13	7	—	27	107	100	—	37	135	113	—	0	642	196	—	—	15	14	180	72500	86	94	5,1
B	31	9	0	0	19	79	67	226	57	94	67	226	71	244	214	768	—	4	3	167	66500	76	83	4,2
C	18	15	0	—	42	47	78	—	68	69	78	—	0	322	607	—	—	4	7	179	68700	86	96	5,6
D	– 12	29	—	13	60	75	—	85	40	125	—	110	0	107	—	285	—	4	8	180	64500	86	92	4,9
E	14	25	—	*	40	57	—	*	60	96	—	*	0	178	—	427	—	8	8	170	60500	79	85	4,3
F	– 32	23	25	25	42	87	167	200	– 3	130	234	275	0	0	0	0	—	0	5	187	79900	89	99	5,7
G	– 26	38	20	—	49	22	50	—	10	68	80	—	70	429	286	—	—	9	7	186	78500	87	95	5,2
H	– 42	43	40	—	100	47	50	—	17	110	110	—	1070	1250	857	—	—	—	—	174	68000	87	101	5,7
I	6	6	0	0	50	63	107	221	60	73	107	221	0	0	0	0	—	4	1	175	67500	82	90	4,6
K	56	4	—	0	17	64	—	221	83	71	—	221	0	232	—	321	—	—	—	173	67700	81	87	4,2
L	– 31	15	(4)	—	67	95	117	-	15	125	128	—	0	357	464	—	—	—	—	172	70500	79	85	4,1

M: Maske.
*: Ausmessung der Kurven nicht möglich.
—: Nicht untersucht.

das Minutenvolumen bei allen zunahmen. Es ist also durchaus nicht jede Vermehrung der Atmung auch mit einer Änderung des Lungenvolumens verbunden.

Besondere Besprechung verlangt weiterhin die Wirkung der Einatmung von 7,5 bzw. 10 % CO_2. Die Einatmung solcher CO_2-Konzentrationen bedeutet eine über hundertfache Veränderung gegenüber den natürlichen Verhältnissen. Trotzdem fällt auf, dass selbst 7,5 % CO_2 oft noch keine solche Lungenvolumvergrösserung macht, wie die Herabsetzung des O_2-Gehaltes auf ein Drittel. Es scheint deshalb, dass es sich hier nicht um eine direkte regulatorische Wirkung handelt, deren Zweckmässigkeit auch nicht verständlich wäre. Dagegen liegen Anhaltspunkte vor, dass die Kohlensäure eine direkte Wirkung auf die glatte Lungenmuskulatur hat; sie hemmt diese und könnte dadurch zu einer Lungenvolumvergrösserung führen. Die sogenannte „lokale bronchomotorische Reaktion" von *Engelhardt*[15]), die durch CO_2-Anhäufung in verschlossenen Alveolarbezirken zu deren Eröffnung führt, sowie die starke Hemmungswirkung der CO_2 auf die glatte Muskulatur der Froschlunge (*Verzár*[16])) zeigen das. Es handelt sich also bei der CO_2-Wirkung nicht um einen Regulationsmechanismus, sondern um eine lokale Reaktion, zu welcher sich allerdings auch eine zentrale Reizwirkung der CO_2 hinzufügen dürfte.

Schliesslich komme ich noch zur Besprechung der Frage, inwiefern etwas über den Mechanismus dieser Lungenvolumvergrösserung bei O_2-Mangel ausgesagt werden kann. Nach *Verzár* spielt dabei die Abnahme des Tonus der glatten Lungenmuskulatur die Hauptrolle. Sie macht das Eröffnen von atelektatischen, oder nach *Engelhardt* nicht atelektatischen, aber verschlossenen Lungenbezirken möglich. Andererseits ist es klar, dass die Arbeitsleistung der Volumvergrösserung nur durch die Zunahme des Tonus der quergestreiften inspiratorischen Atemmuskulatur möglich ist. Diese Atemmuskulatur hat nicht nur eine dynamische, sondern, ebenso wie jeder andere quergestreifte Muskel, auch eine tonische Innervation. Besonders klar hat diese letztere *W. R. Hess*[27]) demonstriert, als er zeigte, dass in Apnoe das Zwerchfell bei Aussaugen der Lunge tonisch innerviert in Inspirationslage geht. *Verzár* und Mitarbeiter[17]) haben 1936 gezeigt, wie man diese Reaktion des Zwerchfells auch bei künstlicher Atmung demonstrieren kann. Wir wissen ferner durch *Hess*, dass das Zwerchfell bezüglich seines Tonus auch mit der thorakalen, inspiratorischen Muskulatur gekoppelt ist. Starker Zwerchfelltonus entspricht einem starken Tonus der inspiratorischen Thoraxmuskeln.

Die Vergrösserung des Lungenvolumens bei Sauerstoffmangel oder bei Muskelarbeit kommt also so zustande, dass sowohl das Zwerchfell wie die inspiratorische Thoraxmuskulatur stärker tonisch innerviert werden. Auf diese erhöhte Tonuslage superponieren sich

dann die inspiratorischen Kontraktionen. Die Ruhelage, d. h. die exspiratorische Lage des Thorax, wird bei einem stärker tonisch innervierten Zustand dieser Muskeln erreicht. Andererseits kann dieser Tonus nur dann eine Wirkung haben, wenn gleichzeitig der glatte Muskeltonus der Lunge nachlässt, so dass mehr Luft in diese eindringen kann. Mit der Zunahme des Tonus der quergestreiften, inspiratorischen Atmungsmuskulatur ist deshalb eine Abnahme des glatten Muskeltonus der Lunge gekoppelt[17]).

Diese dritte Form der Atmungsregulation, d. h. die Vergrösserung des Lungenvolumens bei erhöhtem O_2-Bedarf, gibt uns den funktionellen Sinn für die Tonusveränderungen des Zwerchfells und der andern Inspirationsmuskeln.

VI. Zusammenfassung.

1. Bei Maskenatmung wird die Atmungsfrequenz sehr wechselnd beeinflusst. In allen 11 untersuchten Fällen traten eine Vergrösserung des Atemvolumens und in 10 Fällen auch eine Zunahme des Minuten volumens ein. Das Lungenvolumen vergrösserte sich, ausser in einem Falle, nicht.

2. Bei akutem Sauerstoffmangel von 7 % O_2 werden die Frequenz, das Atemvolumen und das Minutenvolumen vergrössert. In 9 von 11 Fällen nahm auch das Lungenvolumen beträchtlich zu.

3. Bei Einatmung von sehr hohen Kohlensäurekonzentrationen (7,5 bis 10 %) ist die Frequenzzunahme unregelmässig. Dagegen ist die Zunahme von Atemvolumen und Minutenvolumen regelmässig zu beobachten. Ebenso wird auch eine Lungenvolumzunahme bei 9 von 11 Fällen beobachtet.

4. Die Lungenvolumänderungen bei O_2-Mangel und CO_2-Anhäufung wurden auch durch thorakographische Registrierung verifiziert.

5. Die Vergrösserung des Lungenvolumens bei Sauerstoffbedarf ist ein Regulationsmechanismus, der nicht weniger unregelmässig in seiner Grösse ist, als die übrigen Atmungsregulationen, die Änderungen der Frequenz und die Atemtiefe.

6. Der Mechanismus dieser Regulation ist die Tonuserhöhung des Zwerchfells und der übrigen inspiratorischen Muskulatur. Diese ist gekoppelt mit einer Tonusabnahme der glatten Lungenmuskulatur. Ihre Zweckmässigkeit ergibt sich aus einer Vergrösserung der respiratorischen Oberfläche der Lunge.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. F. Verzár, möchte ich meinen besten Dank aussprechen für die stetige grosszügige Unterstützung, die er meiner Arbeit angedeihen liess, insbesondere für die umfassende, abschliessende Durchsicht dieser Arbeit.

Literatur.

[1]) *Bohr, Chr.*, Dtsch. Arch. f. klin. Med. **88**, 385, 1907.
[2]) *Hasselbalch, K.*, Dtsch. Arch. f. klin. Med. **105**, 440, 1912.
[3]) *Hasselbalch, K.*, Dtsch. Arch. f. klin. Med. **93**, 53, 1908.
[4]) *Krogh, A.* und *Lindhard*, J. Physiol. **47**, 112, 1913.
[5]) *Forschbach, F.* und *Bittdorf*, Münch. Med. Woschr. **57 I**, 1327, 1910.
[6]) *Siebeck, R.*, Dtsch. Arch. f. klin. Med. **97**, 219, 1909.
[7]) *Verzár, F.*, Pflügers Arch. **232**, 322, 1933.
[8]) *Asmussen, E.* und *Christensen, E. H.*, Skand. Arch. f. Phys. **82**, 201, 1939.
[9]) *Baltisberger, W.*, Z. Anat. **61**, 229, 1921.
[10]) *Verzár, F.* und *Jecker, L.*, Pflügers Arch. **238**, 379, 1936.
[11]) *v. Gehlen, H.*, Neuere Auffassungen über die Retraktionskraft der Lunge und ihre anatomischen Grundlagen. Verh. d. Anatom. Gesellsch., August 1938, S. 394.
[12]) *v. Möllendorf, W.*, Aschoff-Vortrag 1942.
[13]) *Huizinga, E.*, Pflügers Arch. **238**, 709, 1937.
[14]) *Engelhardt, A.*, Pflügers Arch. **244**, 536, 1941.
[15]) *Engelhardt, A.*, Z. f. Biologie **101**, 21, 1942.
[16]) *Verzár, E.*, Helv. Med. Acta **7**, Suppl. V, 58, 1940.
[17]) *Verzár, F.* und Mitarb., Pflügers Arch. **238**, 387, 1936.
[18]) *Vischer, A.*, Pflügers Arch. **234**, 394, 1934.
[19]) *Bass, E.*, Z. f. ges. exp. Med. **43**, 223, 1924.
[20]) *Guckelberger, M.*, Die Atmung in der Gasmaske. Verh. Schweiz. Physiologen 1942, S. 20.
[21]) *Guckelberger, M.*, Zur Physiologie der Gasmaskenatmung. (Manuskript.)
[22]) *Stucky, P.*, Untersuchungen über die Physiologie der Gasmaskenatmung und deren Verbesserung. (Dissertation Bern 1942.)
[23]) *v. Tavel, F.*, Die Atmung in der Gasmaske. Schweiz. Med. Woschr. **73**, 294, 1943.
[24]) *Matthes, H.*, Z. f. Arbeitsphys. **11**, 117, 1940.
[25]) *Herbst, R.* und *Schellenberg, P.*, Z. f. klin. Med. **120**, 587+595, 1932.
[26]) *Fleisch, A.* Pflügers Arch. **214**, 594, 1926.
[27]) *Hess, W. R.*, Regulierung der Atmung, 1931. Pflügers Arch. **237**, 24, 761, 1936;
[28]) *Verzár, F.*, Int. Physiologen Kongress in Rom 1932.
[29]) Vorläufige Mitteilung: *Schweizer, W.* und *Verzár, F.*, Verh. des Vereins Schweiz. Physiologen, Juni 1942.